



中国火山灾害区划研究历史回顾与未来展望

许建东¹, 万园¹, 王新茹², 潘波¹, 于红梅¹, 赵波¹, 杨文健¹

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100081

摘要: 火山灾害区划是防御和减轻火山灾害的一种有效的方法。以中国境内规模最大、喷发危险性最高、潜在火山灾害最强的长白山天池火山为例, 回顾我国火山灾害区划研究历史, 讨论典型火山喷发活动引起的主要火山灾害类型、成灾机制和灾害效应, 总结不同历史阶段各种不同类型火山灾害区划图的优缺点, 并结合目前国际上火山灾害区划的研究现状和编图技术, 对我国未来编制具有概率含义的火山灾害区划图的思路提出展望。

关键词: 火山灾害区划; 长白山火山; 火山灰; 碎屑流; 熔岩流; 泥石流

REVIEW ON THE DEVELOPMENT OF VOLCANIC HAZARD ZONATION IN CHINA

XU Jian-dong¹, WAN Yuan¹, WANG Xin-ru², PAN Bo¹, YU Hong-mei¹, ZHAO Bo¹, YANG Wen-jian¹

1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100081, China

Abstract: Volcanic hazard evaluation and zonation, as the effective countermeasures, plays an important role in volcanic emergency response and hazard mitigation. Taking Changbaishan volcano as an example, this paper reviews on the study history of volcanic hazard zonation in China. The major types of volcanic hazards in China, which are potentially related with the active volcanoes, involve tephra fallout, pyroclastic flow, lava flow and lahar. The volcanic zoning maps of Changbaishan volcano compiled in 2000 and 2012 respectively show the progresses in volcanic hazard assessment and hazard zonation of China. It is proposed that the probabilistic method such as “event tree” should be applied in compiling the volcanic hazard map of China in future, which represents the most-up-to-date technical trend in volcanic hazard zonation in the world.

Key words: volcanic hazard zonation; Changbaishan volcano; tephra; pyroclastic flow; lava flow, lahar

0 引言

火山灾害是人类主要的自然灾害之一, 国际减灾十年委员会将火山灾害列为第六位主要自然灾害^[1-2]。全球有大约 10% 的人口生活在火山危险地带及其附近。最近 1 000 a 以来就有 1 300 多座火山喷发, 其中

约有 5% 的喷发活动造成了灾难^[3-4]。目前有记载的最为严重的火山灾害是 1815 年的印度尼西亚坦博尔火山喷发^[5], 直接死亡人数 9 万多, 但喷发造成全球气候变化导致粮食绝产又饿死数百万人。最近引起全球关注的火山喷发事件是 2022 年汤加王国洪阿哈阿帕伊

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-05-19. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项“五大连池火山群深部结构与活动性研究”(IGCEA1703); 国家自然科学基金国际合作项目“长白山火山岩浆扰动与喷发灾害研究”(41861144025).

作者简介: 许建东(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事火山地质与灾害研究, 通信地址 北京市朝阳区华严里甲 1 号, E-mail//xujianrong@ies.ac.cn.com

岛 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH)火山发生喷发,喷发柱高出海平面以上 18~20 km,并迅速向四周扩散至火口周围 240 km 的范围,火山喷发所产生的能量引发了整个太平洋的海啸^[6].近年来,由于地球上人口密度不断增大,大量人口不可避免地居住在土壤肥沃的火山区域内,火山灾害就成为了必须面临的重大危险之一.

面对火山的潜在喷发危险和巨大灾害,如何减轻和防御火山灾害成为国际上研究的重点,而火山灾害区划就是其中一种有效的方法^[2-3,7].火山灾害区划是在对某一特定火山的火山灾害研究的基础上,通过数值模拟或经验方法预测未来火山喷发时可能造成的破坏或影响区域,为地方政府的土地使用规划提供参考,也为居民的防灾和避灾提供依据.火山灾害区划包括 3 个因素:火山灾害的类型、火山灾害的范围、火山灾害的程度.不同的火山灾害种类构成不同类型的危害,不同规模的灾害所造成的影响范围和破坏程度也各不相同.这些通常应综合考虑,编制形成一张火山灾害区划图,对上述各类灾害覆盖的区域、活动类型和规模以不同颜色的方式综合表达.

长白山天池火山是中国境内规模最大的一座活火山,在公元 946—947 年发生了巨大的喷发活动,影响到了北半球的大部分地区^[8-10].另外,长白山火山地下岩浆活跃,2002—2006 年间地下小震频发,地表形变异常,具有再次喷发活动的危险^[11].长白山火山不仅引起了中国政府的高度关注,而且东北亚其他国家也担心再次喷发形成巨大灾害,纷纷开展了针对本国可能遭受灾害的研究,如韩国开展了火山灰的灾害区划和应急方案的制定.本研究综合前期对长白山天池火山灾害区划的研究成果,并以此为基础回顾中国火山灾害区划研究历史,总结不同历史阶段各种不同类型火山灾害区划图的优缺点,并结合目前国际上火山灾害区划的研究现状和编图技术,对我国未来编制具有概率含义的火山灾害区划图的思路提出展望.

1 长白山火山概况

长白山天池火山位于中国吉林省东部的中朝边境上,是长白山火山区内 3 座大型破火山口中最新的一座,其喷发活动约始于 5 Ma,经历了造盾阶段(5~2 Ma)、造锥阶段(2~0.05 Ma)和爆炸式喷发阶段

(0.05 Ma 以来)^[12].造盾阶段主要为玄武质岩浆的溢流式喷发,区域内形成了广泛而平坦的熔岩台地;造锥阶段由于岩浆的演化,从玄武质逐渐演化至粗面质,黏度增大,流动性变差,原地堆积逐渐形成了高耸的锥体;而晚期岩浆演化成富含挥发份且易爆炸的碱流质,发生了数次大规模的爆炸喷发活动,将原来高耸的锥体破坏并形成了如今的破火山口,且积水成湖形成了天池.天池目前湖面海拔 2 194 m,最大水深 373 m,蓄水量 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为具有巨大潜在危险的天上悬河^[13-15].

长白山天池火山目前处于爆炸式喷发阶段,该阶段大约始于 50 ka 前的天文峰期喷发,其后又发生了气象站期和千年大喷发期两次大规模的喷发活动^[16-18].除此之外,部分学者还认为存在其他喷发活动,如公元 1018、1124、1265、1373、1401、1573、1668、1702 和 1903 年的喷发^[14,16],但这些喷发目前没有发现火山喷发物,可能仅是无喷发的岩浆扰动事件.其中最为著名的是千年大喷发,该次喷发发生于公元 946—947 年^[19-20],是一次规模巨大的爆炸式喷发,形成了多种火山灾害,如火山灰灾害,喷发柱进入平流层,火山灰扩散至大半个北半球;火山碎屑流灾害横扫方圆 50 km 内的一切,至今仍可见裹挟在碎屑流内的大量碳化木.另外,长白山天池火山还在大约距今 8 ka 前发生了一次以溢流为主的气象站期熔岩喷发活动,熔岩流覆盖在锥体北坡上,是天池火山熔岩流灾害的典型代表^[21].对于天文峰期喷发目前研究较少,主要认识有其喷发时间大约距今 50 ka,且是形成如今天池破火山口的关键喷发.该期喷发地表出露较少,但基本认同其应该也是类似于千年大喷发的一次大规模爆炸式喷发活动^[18].

在历经 20 多年系统性研究与监测工作之后,对于长白山天池火山的喷发历史、喷发过程与深部岩浆机制已经取得了一系列成果和基本认识.长白山天池火山的地球物理探测资料表明,在浅地壳中存在低速异常体,分析认为应是地壳岩浆房.同时,多方资料证实天池火山地下深部仍不断向地壳岩浆房进行物质补充,且两者混合后不断地分异演化.当未来达到一定规模后,具有极高的再次触发喷发的危险性.且当地经过多年的发展,旅游业发达,人口相对密集,一旦发生火山喷发,将产生灾害性的巨大影响,需要给与足够的重视.

2 长白山火山灾害区划历史与现状

2.1 火山灾害的主要类型

火山喷发是岩浆等喷出物在短时间内从火山口向地表的释放。由于岩浆中含大量挥发份,加之覆盖岩层的围压,使这些挥发份溶解在岩浆中无法逸出,当岩浆上升靠近地表时,压力减小,挥发份急剧被释放出来,于是形成火山喷发。火山喷发产生的灾害有两大类:一类是由于火山喷发本身造成直接灾害,另一类是由于火山喷发而引起的间接灾害。实际上,在火山喷发时,这两类灾害常常是兼而有之。直接灾害主要有火山空降碎屑物灾害、火山碎屑流灾害和火山熔岩流灾害;火山喷发引起间接灾害包括火山泥石流、山崩、海啸等。

2.1.1 火山空降碎屑物灾害

火山爆发式的喷发向空中释放大量火山碎屑物,因受重力作用而下降,在降落过程中产生冲击、掩埋和燃烧现象,在其覆盖范围内造成建筑物、耕地、农作物、森林等被破坏和人畜伤亡等,这类灾害在世界上平均每年发生一次。最著名的是公元 79 年意大利维苏威火山喷发,最先喷出的是高黏度的岩浆,继而涌出灼热的火山碎屑流和碎屑堆积物,使当时繁华的庞贝古城被火山渣所掩埋。其他几个著名的海滨城市,如赫库兰尼姆、斯塔比亚等地也遭到严重破坏。1980 年 5 月,美国圣海伦斯火山爆发,在距火山口 10 km 范围内,无一林木得以保存。此外,降落的火山灰使很大范围的空气、水质受到污染,特别是硫、盐酸等化合物粘在火山灰上,对动植物极其有害。如 1970 年冰岛海克拉火山爆发时,富含氯化物的火山灰降落在牧草上达 1~6 mm 厚,致使 7 000 头食草的羊群死去。

2.1.2 火山碎屑流灾害

在火山喷发时,由热气托着固体颗粒,以高速密集的射流喷出。山坡等地形对炽热火山碎屑流的行进几乎没有任何摩擦阻力,因此所到之处灾害严重。1902 年培雷火山爆发时,充满气体且黏度很高的岩浆猛烈喷发和爆炸,炽热的气体形成飓风,伴随着山崩,以约 100 km/h 速度从斜坡冲下来,构成一股由温度高达 800 ℃的气体(主要是 CO₂)、玻璃质和尘土组成的火山碎屑流,顷刻吞没了山下的圣·皮尔市。具有破坏性的火山碎屑流,在世界上平均每百年约发生 40 起。由于火山碎屑流的速度快,避开困难,横扫一切,破坏力大,

加之温度高易发生重大火灾,所以它是火山喷发灾害严重的致灾因素。

2.1.3 火山熔岩流灾害

熔岩流是地下岩浆喷出地表后的高温流体,其温度一般是在几百至 1 200 ℃左右。当岩浆喷溢流动时,因其黏度不同,其流速也不一样,一般为几千米每小时,如不及时躲开也很危险。熔岩流所经之处,能破坏建筑物、森林、耕地等,使之变成不毛之地。熔岩覆盖面积的大小,与熔岩黏度、地形条件等有关。熔岩流进入沼泽和水中,能产生第二次爆炸,在靠近冰川的地方,也有发生洪水泛流的情况。历史上有记载的最大熔岩流是 1783 年冰岛拉基火山喷发,从 16 km 长的裂隙中同时喷出玄武岩,溢满了附近的冰川河床,并蔓延到周围的村庄和海滨地区,覆盖面积达 565 km²。

2.1.4 火山泥石流灾害

火山泥石流是由火山喷发碎屑物与水相混合的流动体,同火山碎屑流具有同样快速和猛烈的破坏作用,而且在火山灾害中发生的几率较高。世界上平均每年发生一次以上。因火山喷发死亡的人数中,至少有 10%是由泥石流灾害造成的。如哥伦比亚鲁伊斯火山 1985 年 11 月 13 日的喷发虽然发生于没有人类活动的山区,但火山喷发融化了冰雪,形成的泥石流厚达 40 m,携带土壤和岩块,以 50 km/h 的速度向山口快速流动。火山喷发 2.5 h 后,到达了距喷发口 74 km 阿梅罗镇,经过短短的 4 h,阿梅罗镇被摧毁,造成了 23 000 居民死亡、5 000 人受伤、5 000 幢房屋被毁的严重火山次生灾害。

2.2 长白山火山灾害区划研究历史

2.2.1 早期的火山灾害区划

中国早期的火山灾害区划研究开始于 20 世纪 90 年代,1997 年“中国若干近代活动火山的监测与研究”项目(95211)正式启动,中国地震局首次对长白山、五大连池与腾冲火山进行了较系统的监测与研究。在项目实施过程中,本着“以古论今”基本原则,即假设大体相同的火山区很可能受同类喷发事件的影响,火山的未来行为在事件的类型、频率和量级上与过去的喷发行为是相似的。基于这种历史事件重演原则,以长白山天池火山历史上大规模喷发所产生的灾害范围为参考,对于未来同样规模的火山喷发的可能的灾害范围给出了半定量化的厘定,完成了第一张长白山、腾冲火

山灾害区划图^[22].

根据降落堆积物的类型和厚度,把降落灾害程度分为重灾区、中等灾害区、轻灾区(图 1). 空降重灾区是指遵循弹道轨迹抛射的火山碎屑降落物以及自火山喷发云中降落的火山碎屑降落物,该区的分布范围以天池火山口为中心半径 13 km 的范围. 空降中等灾害区是厚度大于 10 cm 的碎屑物降落区. 因为 10 cm 的空降层相当于 100~200 kg/m² 的载荷,可引起许多平顶或尖顶建筑物坍塌. 在火山口外 30 km 处,浮岩温度仍可在燃点以上. 该区空降碎屑物分布主要受风的影响. 天池火山历史上的大喷发受西北风影响,未来的降落灾害在天池火山东南侧. 空降轻灾区是厚度小于 10 cm 的碎屑物降落区,该区主要是对人类的生活

和生产造成影响,部分土质房屋会受到破坏,森林会受到影响. 细粒火山尘对引擎、管道的堵塞、粘附作用影响范围会更远,虽然对人类生命不构成严重威胁,但会严重影响人的呼吸系统并会刺激灼伤眼睛. 如果喷发时火山灰含有大量的有毒物质(如历史上曾经发生的富 F、Cl、S 的喷发),还需要考虑火山灰对于水体、食物链的污染作用.

根据火山碎屑流的搬运机制和堆积物的特征,将其分为碎屑流重灾区 and 碎屑流中等灾害区(图 1). 火山碎屑流重灾区是火山碎屑流的主体部分,以层流搬运,堆积物不显层理. 它是一种炽热的气固体混合高度流体化的流动体,具有很高的流速,可达 160 m/s,可翻越很高的障碍. 这个区是以天池火山口为中心,半

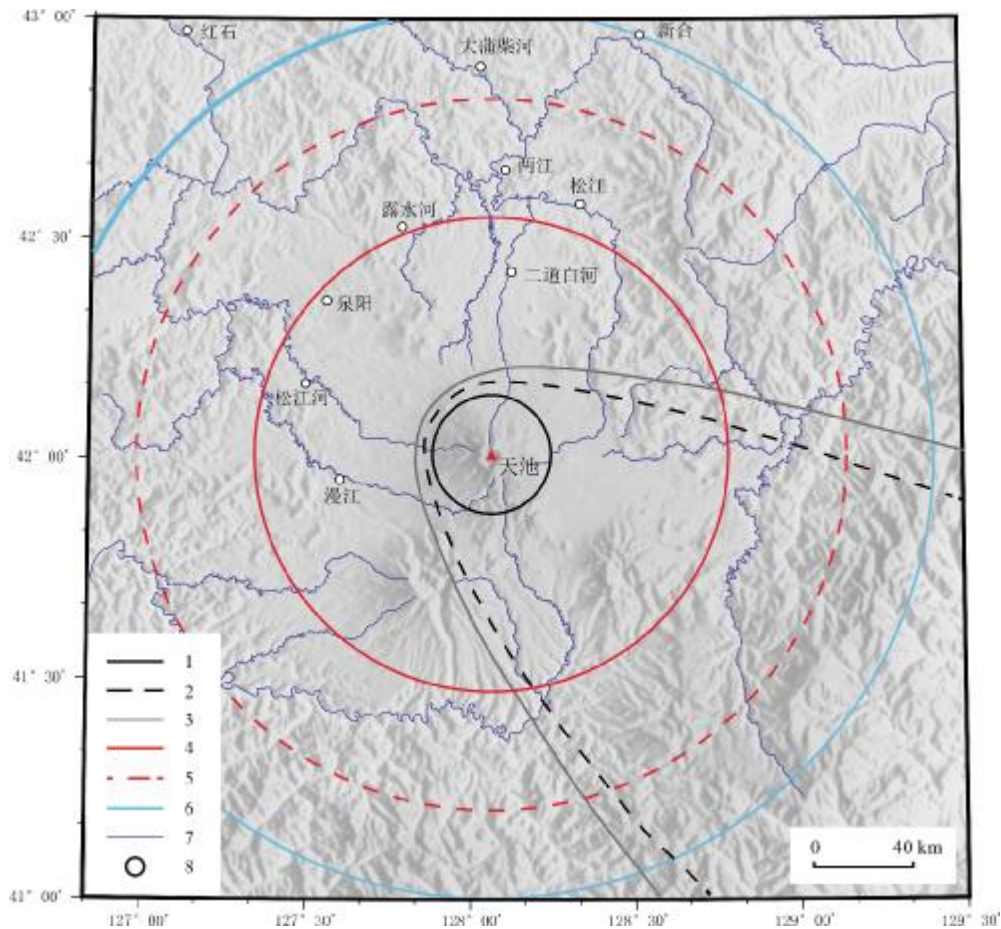


图 1 长白山天池火山灾害区划图
(据文献[22]修改)

Fig. 1 Volcanic hazard map of Changbaishan Tianchi volcano
(Modified from reference [22])

1—空降重灾区 (area affected by ballistic debris); 2—空降中等灾害区 (area affected by tephra deposition > 10 cm); 3—空降轻灾区 (area affected by tephra deposition < 10 cm); 4—火山碎屑流重灾区 (area overrun by high density pyroclastic flow); 5—火山碎屑流中等灾害区 (area overrun by low density pyroclastic flow); 6—火山泥石流重灾区 (area inundated by lahar); 7—河流 (river); 8—城镇 (town)

径 40~60 km 的范围. 在这个区带将发生流动冲撞、掩埋、高温灼烧等破坏作用,造成火灾、建筑物、桥梁、植物、水电站、微波站、道路等毁灭性破坏以及人员伤亡等. 火山碎屑流中等灾害区是火山碎屑流派生的灰云浪部分,以湍流搬运,堆积物具有交错层理. 灰云浪影响范围将会超过 60 km 半径范围,可能会达到 75~90 km 范围. 与远缘相空降型火山灰灾害类型相似,灰云浪对空气与水源的污染作用、引擎堵塞作用是主要的灾害效应.

根据火山泥石流的特点、河流的密集程度、原生火山碎屑的分布将火山泥石流灾害分为重灾区 and 中等灾害区带. 重灾区分布岩屑流,即岩屑比例高、岩屑颗粒大,河流密布,是原生火山碎屑堆积如火山碎屑流堆积物的主要分布区. 以火山口为中心分布的半径为 75 km 左右(图 1). 在这个区内形成高速冲撞、掩埋作用,造成居民点、建筑物、桥梁、铁路、水电站等毁灭性破坏和人员伤亡. 中等灾害区分布着火山泥石流及火山泥石流消退流,即岩屑含量变低、浮岩及泥质含量增高,主要沿三江流域分布,其分布距火山口 240 km 以外,在这个区内以掩埋、冲击、堵塞作用为主. 造成水库淤积、村庄淹没等.

从总体上看,早期“以古论今”为原则的火山灾害区划图编制,通过研究火山的过去喷发行为,以过去火山喷发行为或最具破坏性的喷发事件为参照系,评估预测未来火山喷发的可能影响范围和灾害程度. 虽然以定性、半定量评价方法为主,仅仅给出了不同灾害类型影响的大致宏观范围,缺乏详细和具体的评价结果,但初步提出了火山灾害区划的原则、工作程序、灾害区划工作的内容和方法,为进一步的火山灾害区划研究打下了基础.

2.2.2 晚期的火山灾害区划

火山灾害区划的进一步研究开始于中国地震局地质研究所在实施地震行业科研专项“中国主要活动火山喷发序列研究与灾害预测”(200708027)项目中的实践. 这项研究使用了从地质调查和地质年代学中获得过去喷发数据,来模拟火山空降物、火山碎屑流、熔岩流和火山泥流分布范围,采用了几种被广泛接受的数值模型来模拟不同喷发规模的每种灾害. 随后按照风险程度进行了灾害区域划分,绘制了长白山-天池火山的综合灾害风险区图^[23](图 2).

在长白山天池火山综合灾害风险图的编制过程中,综合考虑了长白山天池火山的历史灾害情况和相关研究成果,采用数值方法先分别对各个灾害类型进行数值模拟,编制分灾种的灾害区划图,最后汇总各灾种的灾害情况综合编制长白山天池火山灾害区划图. 在综合对比各种灾害数值模型的基础上,选择了当前应用相对广泛和相对成熟的模拟方法,具体模拟方法与模拟结果如下.

火山空降灾害的模拟计算分为抛射部分和扩散部分. 抛射部分的计算使用 Charles(2001)编写的 Eject 模型,设定抛射初始速度为 300 m/s,在不同角度下计算获得抛射的最远距离为 7.2 km,即火口周围 7.2 km 应为极危险区域. 扩散模型模拟参数的选择主要依据: 1)野外调查千年大喷发期和天文峰期两次喷发空降浮岩的分布、粒径、颗粒密度和形状参数等. 2)长白山区域内气象台 1980—2009 年的风向资料与不同高度风速变化资料^[24]. 在此基础上,将喷发柱高度作为衡量喷发规模的一个参数,分别设定了喷发柱高度 10、20、30 km 进行空降灾害的模拟,发现随着喷发规模的增大,影响范围也不断扩大. 喷发柱为 10 km 时,火山灰 1 cm 厚度线顺风方向最远到达约 200 km;而喷发柱为 30 km 时,火山灰 1 cm 厚度线顺风方向最远到达约 450 km.

火山碎屑流模拟计算使用了 Flow3D 模型. 模拟中设定的物理参数主要来源于千年大喷发火山碎屑流的研究数据,如碎屑流密度 790 kg/m³,单碎屑体积 0.001 26 m³. 另外,碎屑流是受地形强控制的流体,因此模拟中根据长白山火山区 DEM 资料选择了 12 条沟谷作为碎屑流流动的通道,并且测量了这 12 条沟谷的地形高程和坡度. 模拟以喷发柱高度来控制喷发的规模,设定了 10、20、30 km 喷发规模,且假设喷发柱自天池火口上方坍塌,仅沿设定的 11 条沟谷流动扩散. 模拟计算结果显示,10 km 喷发柱形成的碎屑流的流动长度介于 10.1~13.7 km 之间;20 km 喷发柱形成的碎屑流的流动长度介于 31.8~35.4 km 之间;30 km 喷发柱形成的碎屑流的流动长度介于 50.3~57.8 km 之间. 研究发现 3 个喷发规模下沿二道白河沟谷里流动的距离最长^[25].

火山熔岩流的模拟使用了热流变运动学 FLOWGO 模型. 该模型的参数设置包括熔岩参数、环

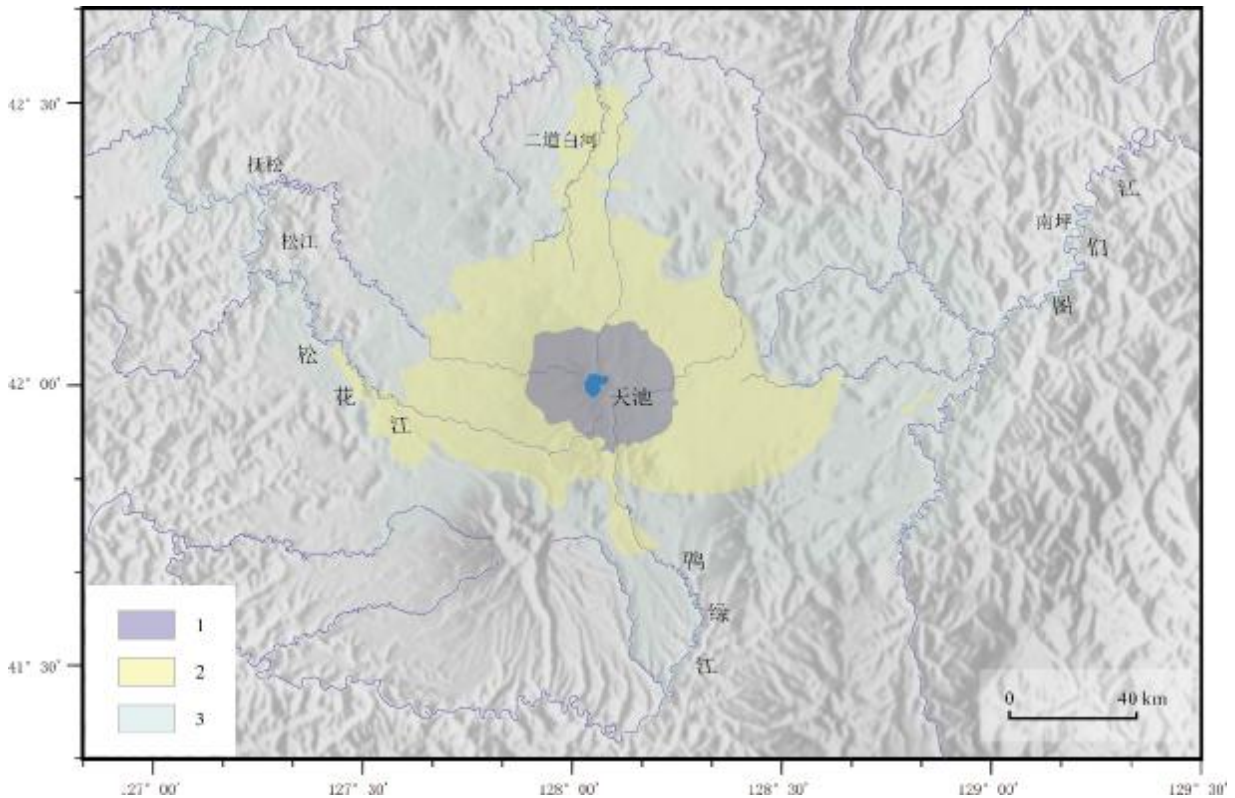


图2 长白山天池火山的综合灾害风险区图

Fig. 2 Comprehensive volcanic hazard zoning map of Changbaishan Tianchi volcano

1—高风险灾害区 (high-risk hazard area); 2—中等风险灾害区 (medium-risk hazard area); 3—低风险灾害区 (low-risk hazard area)

境参数和地形参数3个部分. 熔岩参数的选取参照了气象站期熔岩流的研究数据, 如熔岩密度 $2\ 380\ \text{kg/m}^3$, 溢出口温度 $1\ 328\ \text{K}$. 环境参数的选取则根据区域气象台的历史数据, 如大气温度使用长白山天池年平均气温 $-5\ ^\circ\text{C}$. 地形参数的设定与碎屑流模拟相似, 选取设定了15条熔岩流流动路径, 并测绘了路径的高程和坡度. 模拟计算中设定以火口周缘为熔岩溢出口或寄生火口发育点, 利用溢出率来控制熔岩的喷发规模, 分别设定了 100 、 200 、 350 、 $500\ \text{m}^3/\text{s}$ 四个喷发等级, 计算出了不同规模喷发沿不同路径熔岩流流动所能达到的最远距离^[26].

火山泥石流的模拟使用了基于半经验模型的 LAHARZ 软件. 该模型的参数包括能量锥阈值、爆发总体积和地形参数3个部分. 能量锥阈值依据千年大喷发喷发柱高度和区域平均地形坡度计算得 0.07 . 地形参数使用区域的 DEM 高程资料, 在 LAHARZ 软件自动计算出的河流中选取4条火山泥石流易发河道作为模拟路径. 爆发总体积成为控制火山泥石流规模的主要参数, 分别设定了 108 、 109 、 $1\ 010$ 、 $1\ 011\ \text{m}^3$ 四个

喷发规模. 依据上述参数开展了模拟计算, 得出了不同喷发规模条件下泥石流沿各河道流动的最远距离^[27].

基于各灾害类型的特征和数值模拟方法, 分别完成了各灾种的灾害区划, 并绘制了相应的灾害区划图, 划定了不同规模灾害的影响范围, 这为单一灾种的防御提供了参考. 然而, 火山的喷发活动是复杂的, 通常一次喷发可能产生多种灾害类型, 而同一区域也可能遭受多种灾害类型的破坏和影响, 因此建立综合性的火山灾害区划图对于火山区地方政府和民众防御火山灾害会更加有效和实用.

最终完成的长白山天池火山灾害区划图, 综合不同灾害类型的具体情况, 围绕长白山天池火山口划分了3个等级的风险灾害区域 (图2). 高风险区位于近火口的锥体之上, 除火山泥石流外, 其余灾种在该区均可造成严重的破坏, 是重点防御区域. 中等风险区位于距火口 $15\sim 60\ \text{km}$ 的区域, 主要为火山碎屑流的影响区域, 小规模喷发时此区相对安全, 但中大规模喷发时仍将遭受严重破坏. 低风险区域位于距火口 $60\sim$

100 km 的河谷内,主要为火山碎屑流和火山泥石流的影响范围。

高风险灾害区:整体呈面状分布在距火口约 15 km 的范围内,主要为火山熔岩流、抛射碎屑、顺风向空降浮岩和火山碎屑流所形成的灾害区域。由于该区距离火口近,喷发物温度高,密度大,且速度快,对人类生命财产可造成巨大影响,属于高风险区域。但此区域范围整体有限,加之良好的火山监测可提前预警火山的喷发活动,使人员尽早撤离避免伤亡。

中等风险灾害区:分布在距火口 15~60 km 的相对低洼区域,主要受火山碎屑流、火山泥石流和空降浮岩的破坏和影响,属于灾害泛滥区域。该区随着搬运距离的增大,火山喷发物的温度降低、体积变小,势能减弱,风险性有所降低,但对于中等规模以上的喷发活动,破坏性还是巨大,因此仍需做好财产的规避和人员的疏散。

低风险灾害区:分布在距火口 60~100 km 的山麓地区和低洼河谷内,主要受火山碎屑流和火山泥石流的破坏和影响。该区远离火口,火山熔岩流和碎屑流物质难以到达该区,但在湖水或降雨的作用下产生火山泥石流,沿河道及两侧造成破坏,该区人员需提高警惕,当发出火山泥石流预警之时尽快撤离,避免不必要的人员伤亡。

长白山天池火山的综合灾害风险区图,充分考虑了长白山火山不同历史灾害类型的具体情况,通过利用新的火山灾害模拟技术,给出了天池火山爆发时在火口周缘所形成的灾害情况和危险程度。这些工作将为地方政府建立火山灾害应急方案和规划地方建设提供科学依据,也为提高火山区周围民众的防灾意识和疏散避险能力提供帮助。

3 结论与讨论

中国的火山监测与灾害评估工作起步较晚,由于缺少现代火山喷发,我国火山研究者没有直接观测火山喷发机会和实施火山减灾的经验,除了研究历史喷发所遗留的喷发物外,我国早期火山灾害区划的相关研究主要集中在野外调查和各种喷发物的鉴定、分期、灾害类型识别等方面,火山灾害区划图以定性和半定量化的表述为主。

近些年来开展的火山灾害评估与灾害区划图编制

等尝试性的研究,通过开展中国大陆以长白山火山为代表的不同类型火山未来的火山作用特征、可能的灾害类型和发育程度的研究,参考国际流行的火山灾害模拟技术,建立了反映中国火山活动特点的空降物扩散模型、碎屑流流动模型、火山泥石流模型和火山熔岩流模型,并以此为基础编制了长白山火山灾害区划图,实现了中国火山灾害区划研究与国际火山学潮流的同步。

目前在国际上有关火山灾害区划图还没有形成完全统一的标准,其技术模型、分析方法和火山灾害风险管理方面也有所差异,但基本的方法与思路已经成形,并逐步走向成熟,比如说对灾害进行量化并利用概率论的方法预测火山灾害的“事件树”的发展与应用^[28]。我们要继续借鉴国际上的先进经验,发挥我们的特点与优势,继续开展中国大陆不同活动火山地区的火山灾害评价与编图技术研究,提升我国火山灾害区划的研究水平和国际影响力。

参考文献(References):

- [1]魏海泉. 火山灾害的类型、预测与防治[J]. 地质灾害与防治, 1991, 2(2): 96-98.
Wei H Q. The types, prediction and control of volcanic hazards[J]. Journal of Geological Hazard and Control, 1991, 2(2): 96-98. (in Chinese)
- [2]许建东. 我国火山灾害的主要类型及火山灾害区划图编制现状探讨[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3): 266-272.
Xu J D. The major types of potential volcanic hazard of China and hazard mapping technique [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3): 266-272.
- [3]Favalli M, Tarquini S, Fornaciai A, et al. A new approach to risk assessment of lava flow at Mount Etna[J]. Geology, 2009, 37(12): 1111-1114.
- [4]Doocy S, Daniels A, Dooling S, et al. The human impact of volcanoes: A historical review of events 1900-2009 and systematic literature review[J]. PLOS Currents Disasters, 2013, doi: 10.1371/currents.dis.841859091a706efebf8a30f4ed7a1901.
- [5]Stothers R B. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath [J]. Science, 1984, 224(4654): 1191-1198.
- [6]许建东, 王佳龙. 汤加海底火山喷发特征与灾情启示[J]. 城市与减灾, 2022(1): 1-6.
Xu J D, Wang J L. Characteristics and revelation of the 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano[J]. City and Disaster Reduction, 2022(1): 1-6. (in Chinese)
- [7]Scarpa R, Tilling R I. Monitoring and mitigation of volcano hazards

- [M]. Berlin: Springer, 1996.
- [8]Machida H. The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 21(1/3): 71–94.
- [9]Pan B, de Silva S L, Xu J D, et al. The VEI-7 millennium eruption, Changbaishan-Tianchi volcano, China/DPRK: new field, petrological, and chemical constraints on stratigraphy, volcanology, and magma dynamics[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, 343: 45–59.
- [10]Sun C Q, Plunkett G, Liu J Q, et al. Ash from Changbaishan millennium eruption recorded in Greenland ice: Implications for determining the eruption's timing and impact [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 694–701.
- [11]Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al. Recent unrest of Changbaishan volcano, Northeast China: A precursor of a future eruption? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16): L16305.
- [12]金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究[M]. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994.
- Jin B L, Zhang X Y. Research on volcanic geology in Changbai Mountains [M]. Yanji: Education Press of Northeast China Korean Minority, 1994. (in Chinese)
- [13]杨清福, 原晓军, 武成智, 等. 中朝边境天池破火山口湖底地形多波束测深探测[J]. *岩石学报*, 2018, 34(1): 185–193.
- Yang Q F, Yuan X J, Wu C Z, et al. The multibeam sounding exploration of the Tianchi caldera lakebed topography at the China-North Korea border[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(1): 185–193.
- [14]刘若新, 魏海泉, 李继泰. 长白山天池火山近代喷发[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Liu R X, Wei H Q, Li J T. The recent eruptions of Changbaishan Tianchi volcano [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [15]洪汉净, 吴建平, 王庆良, 等. 中国火山危险性等级与活动性分类[J]. *地震地质*, 2007, 29(3): 447–458.
- Hong H J, Wu J P, Wang Q L, et al. Volcanic threat levels and classification of volcanic activity in China [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(3): 447–458.
- [16]许建东. 火山灾害与火山喷发预测预警[J]. *城市与减灾*, 2017 (1): 11–15.
- Xu J D. Volcanic hazard and eruption early warning [J]. *City and Disaster Reduction*, 2017(1): 11–15. (in Chinese)
- [17]Sun C Q, Liu J Q, You H T, et al. Tephrostratigraphy of Changbaishan volcano, Northeast China, since the mid-Holocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 177: 104–119.
- [18]Pan B, de Silva S L, Xu J D, et al. Late Pleistocene to present day eruptive history of the Changbaishan-Tianchi volcano, China/DPRK: New field, geochronological and chemical constraints[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, 399: 106870.
- [19]Xu J D, Pan B, Liu T Z, et al. Climatic impact of the Millennium eruption of Changbaishan volcano in China: New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(1): 54–59.
- [20]Oppenheimer C, Wacker L, Xu J D, et al. Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946 CE [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 158: 164–171.
- [21]Sun C Q, Wang L, Plunkett G, et al. Ash from the Changbaishan Qixiangzhan eruption: A new early Holocene marker horizon across East Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123 (8): 6442–6450.
- [22]杨清福, 姜朝松, 刘若新. 三个火山区火山灾害区划图的编制与减灾对策研究[M]. 吉林省地震局, 2000.
- Yang Q F, Jiang C S, Liu R X. Compiling volcanic hazard maps of the three volcanoes and their hazard mitigation [M]. Earthquake Agency of Jilin Province, 2000. (in Chinese)
- [23]Wan Y, Xu J D, Pan B, et al. Volcanic hazard mapping for Changbaishan-Tianchi region, China [J/OL]. *Journal of Earth Science*. (2021-11-01). https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZDDY20211028000&uniplatform=NZKPT&v=iZnSxizK2gnZ7AaF2u02bVjByag61irqpF2co1b6PWHaLrn_Z_Kk59CytBjz-IN4w.
- [24]于红梅, 许建东, 赵谊. 长白山天池火山千年大喷发空降落屑物的数值模拟[J]. *地震地质*, 2007, 29(3): 522–534.
- Yu H M, Xu J D, Zhao Y. A numerical simulation of tephra transport and deposition for millennium eruption of Changbaishan Tianchi volcano [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(3): 522–534.
- [25]王新茹, 赵波, 万园, 等. 长白山天池火山碎屑流灾害区划[J]. *震灾防御技术*, 2015, 10(2): 262–270.
- Wang X R, Zhao B, Wan Y, et al. Pyroclastic flow hazard zonation of Changbaishan Tianchi volcano [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2015, 10(2): 262–270.
- [26]潘波, 许建东, 林旭东, 等. 基于热流变运动学模型的长白山熔岩流数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(9): 2317–2324.
- Pan B, Xu J D, Lin X D, et al. Modeling the lava flow of Changbaishan volcano, China based on kinematic thermo-rheological model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(9): 2317–2324.
- [27]万园, 许建东, 林旭东, 等. 基于数值模拟的长白山天池火山泥石流灾害展布范围分析及预测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1638–1645.
- Wan Y, Xu J D, Lin X D, et al. Analysis to the lahars extent in Changbai Mountains by numerical simulation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1638–1645.
- [28]Neri A, Aspinall W P, Cioni R, et al. Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 178(3): 397–415.